

Análisis de Integridad de un Componente Estructural de un Puente Vehicular

Luis Alejandro Alcaraz Caracheo

Instituto Tecnológico de Celaya
alejandro.alcaraz@itcelaya.edu.mx

Adolfo Campos Tovar

Instituto Tecnológico de Celaya
adolfo0489@hotmail.com.mx

Karla Judith Moreno Bello

Instituto Tecnológico de Celaya

J. Santos García Miranda

Instituto Tecnológico de Celaya

Álvaro Sánchez Rodríguez

Instituto Tecnológico de Celaya

RESUMEN

Se presenta un análisis de integridad de un componente estructural (anclaje) del puente del Río Papaloapan. El análisis se realizó utilizando tres diferentes Diagramas de Análisis de Fallo (DAF), 2 de ellos empleando procedimiento europeo FITNET y el tercero el modelo Dugdale. Se utilizó el software Ansys Workbench para el cálculo del factor de intensidad de esfuerzos del anclaje con grieta. Se observó que el factor de seguridad mayor se obtuvo de la opción 3 del procedimiento FITNET, el cual requiere mayor conocimiento de las propiedades mecánicas del material. Además se obtuvieron los valores críticos de carga y de tamaño de grieta para el anclaje.

PALABRAS CLAVES: análisis de integridad, anclaje, acero colado, factor de intensidad de esfuerzos, FITNET.

1. INTRODUCCIÓN

La sociedad busca seguridad en su vida diaria, seguridad en las construcciones que utiliza para vivir y transitar. Para tener cierta seguridad, el hombre ha buscado la forma de diseñar y construir utilizando los mejores materiales, pero como sabemos, los materiales no son perfectos, ya que contiene defectos (ejemplo: impurezas, discontinuidades y grietas) que condicionan su ruptura.

En el año 2000, después de 5 años de servicio, uno de los 112 anclajes superiores del puente del Río Papaloapan cedió por una falla repentina provocando que el puente estuviera en función de 111 tirantes disminuyendo la seguridad del puente. Evaluaciones realizadas por empresas especializadas determinaron que una de las causas por la cual el anclaje falló fue que el material con el que estaba construido contenía alto contenido de defectos [11,12].

La motivación del proyecto surge de la necesidad de determinar la condición actual de los anclajes y si pueden seguir desempeñando su función mecánica de manera segura, así como las condiciones críticas (tamaño de grieta crítica y carga crítica) a las cuales el componente fallaría, para las situaciones de tránsito actual y un tránsito para el puente con una proyección de 30 años.

El análisis de integridad realizado es basado en la utilización de Diagramas de Análisis de Fallo (DAF) postulando una grieta con la geometría y dimensiones encontradas en uno de los anclajes analizados [12].

2. ANÁLISIS DE INTEGRIDAD

2.1 INTEGRIDAD ESTRUCTURAL

La integridad estructural es utilizada para demostrar la “idoneidad para el servicio” de componentes y estructuras ingenieriles a lo largo de su vida operativa. Surgió a mediados de los años 70 con el objetivo de desarrollar una disciplina que evalúa simultáneamente la situación frente al colapso plástico y frente a la falla por fractura. La integridad estructural engloba un amplio abanico de disciplinas de análisis, como por ejemplo, la resistencia de materiales, la mecánica de la fractura, técnicas de auscultación y reparación de componentes estructurales, aplicable a un espectro importante de industrias como la generación de energía y el transporte. Si se usa correctamente, la metodología de análisis de la integridad estructural puede proporcionar un correcto equilibrio entre economía y seguridad al evitar reparaciones absolutamente innecesarias durante la vida en servicio de la estructura.

2.2 DIAGRAMAS DE ANÁLISIS DE FALLO (DAF)

El Diagrama de Análisis de Fallo representa un análisis gráfico integrado en el que se evalúan de forma simultánea la fractura y el colapso plástico a través de dos variables adimensionales K_r y L_r .

Los procedimientos de análisis de integridad, como SINTAP (Structural Integrity Assessment Procedure for European Industry) y FITNET (European Fitness for Service Network), presentan distintas curvas límite para construir un diagrama de análisis de fallo, donde se caracteriza por tener una región segura o aceptable y otra región inaceptable o insegura. La figura 1 muestra un ejemplo típico de un DAF.

Estos métodos representan una filosofía distinta de la que pudiera definirse como “clásica” en los cálculos estructurales ya que no se considera de forma directa y explícita el esfuerzo aplicado a un componente estructural versus la resistencia del material, por lo que se pierde la facilidad de interpretación. No obstante, la sencillez y rapidez con las que se pueden acometer ciertas evaluaciones estructurales hacen recomendable el uso de estos diagramas en muchas situaciones.

Para un determinado componente que se encuentra en una situación aceptable, A, su correspondiente factor de seguridad frente al fallo con respecto a la carga aplicada se determina trazando una línea recta que pasa por el origen del sistema de coordenadas y por el punto de evaluación; si la distancia del origen a la línea de fallo según la recta es OB y la distancia del origen al punto de evaluación es OA, el factor de seguridad se define como el cociente OB/OA, como se observa en la figura 2.

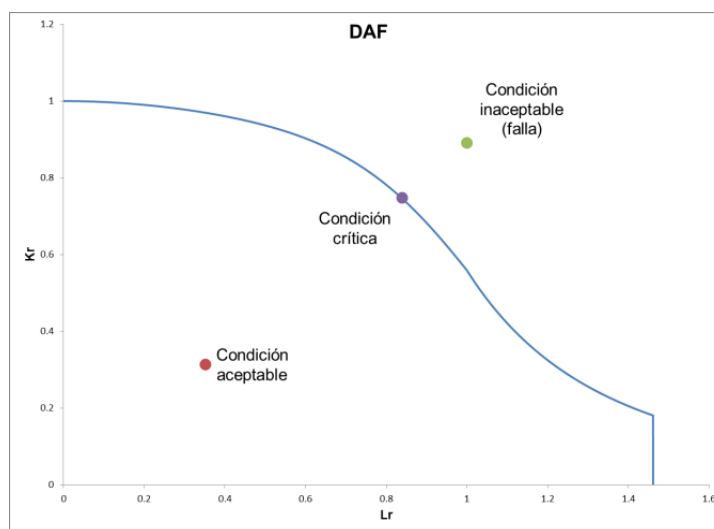


Figura 1. Análisis con Diagrama de Análisis de Fallo.

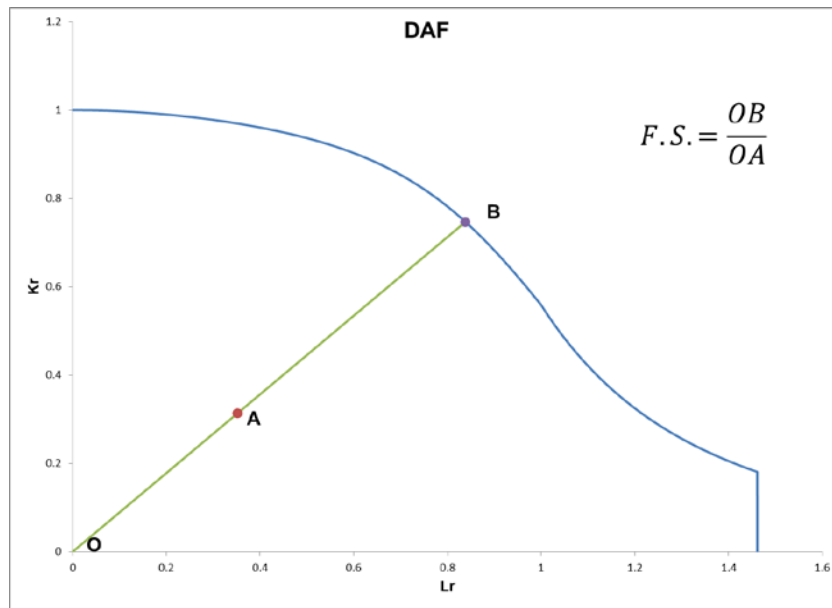


Figura 2. Cálculo del Factor de Seguridad.

La carga crítica es la carga a la cual el componente fallaría si se mantuviesen las dimensiones de la grieta, esta se calcula utilizando el punto crítico B del DAF. Lr es la relación de la esfuerzo (σ) entre el esfuerzo de fluencia (σ_Y), pero ahora conociendo la coordenada Lr crítica se puede conocer el esfuerzo crítico haciendo un simple despeje.

2.3 FITNET

El proyecto FITNET (European Fitness for Service Network) nació a comienzos del año 2002 financiado por el 5º Programa Marco de la Unión Europea. Su objetivo fundamental ha sido crear un procedimiento europeo unificado que cubra las cuatro principales formas de fallo de componentes y estructuras: fractura-colapso plástico, fatiga, fluencia y corrosión. Coordinado por el GKSS Research Centre (Alemania) trabajado bajo una estructura matricial.

En lo que concierne al módulo de fractura, el FITNET se ha basado en el SINTAP (Structural Integrity Assessment Procedure for European Industry) y recoge todos los avances que en los últimos años han ido incorporando procedimientos como el R6 o normas como la BS 7910. Dos enfoques para la determinación de la integridad de las estructuras y componentes agrietados han sido seleccionados por los procedimientos FITNET. El primero utiliza el concepto de un Diagrama de Análisis de Fallo (DAF) y el segundo el Diagrama de Fuerza Motriz de Agrietamiento (DFMA). Ambos enfoques se basan en los mismos principios científicos, y dan resultados idénticos cuando los datos de entrada se tratan de forma idéntica. Hay diferentes opciones ó niveles de análisis disponibles para el usuario (ver Tabla 1), cada uno es dependiente de la calidad y el detalle de los datos de las propiedades del material disponible. El usuario debe ser consciente de que cuanto mayor es el nivel de análisis, mayor es la calidad requerida de los datos de entrada, y más compleja son las rutinas de los procedimientos.

Tabla 1. Niveles de análisis FITNET.

Nivel	Nivel 0	Nivel 1	Nivel 3	Nivel 5
Datos de entrada	σ_y	$\sigma_y + \sigma_U$	Curva $\sigma - \epsilon$	Curva $\sigma - \epsilon$
	K_{IC}	K_{IC}	K_{IC}	I_R
Diagrama de análisis	Curva por defecto	Curva por defecto con endurecimiento por deformación	Curva específica de cada material	Curva específica de cada material
Tipo de análisis	Muy sencillo	Sencillo: solo iniciación	Sencillo: solo iniciación	Completo: desgarro dúctil

3. ANÁLISIS DEL ANCLAJE

3.1 PROPIEDADES DEL MATERIAL

Las propiedades conocidas del material son: la tenacidad a la fractura (K_{IC}), el esfuerzo de fluencia (σ_y), el esfuerzo último a la tensión (σ_U) y módulo elástico (E), así como los datos del diagrama esfuerzo-deformación. Estas características del material son obtenidas de ensayos previos realizados a probetas obtenidas de un par de anclajes por Dr. Alcaraz [1], retirados del puente durante su etapa de rehabilitación, fabricados de acero colado.

Para obtener el esfuerzo de fluencia, el esfuerzo último a la tensión y módulo elástico, se tomaron los resultados promedios a partir de ensayos a tensión realizados a 9 probetas maquinadas a partir de uno de los anclajes, los ensayos fueron realizados de acuerdo a la norma ASTM E8M-04, teniendo como resultado los siguientes valores: $E = 199 \text{ GPa}$, $\sigma_y = 323 \text{ MPa}$ y $\sigma_U = 621 \text{ MPa}$ [1].

Para obtener el valor de la tenacidad a la fractura (K_{IC}) se revisaron los resultados obtenidos a partir de los ensayos, donde se utilizaron un par de especímenes de tipo SE(B) de acuerdo al estándar ASTM E399-09. Obteniendo un valor promedio de los ensayos de $39.4 \text{ MPam}^{0.5}$ [1].

3.2 CARGAS

La fuerza a la que está sometido el anclaje se obtuvo de pruebas experimentales realizadas con anterioridad. De los resultados la carga seleccionada corresponde al tirante 11 de la semiarpa 3, el cual era el valor más alto, 2.89 MN (294.35 Toneladas), registrado. Este valor corresponde al escenario actual del parque vehiculara que

transita sobre el puente. Además se tomó un segundo valor para la carga de 3.06 MN (312.011 Toneladas) que corresponde a una proyección del crecimiento del parque vehicular que transitaría en el futuro, a 30 años, para el puente, con un aumento de 6% [11].

3.3 TAMAÑO DE GRIETA

Postulando una grieta superficial semielíptica para el análisis del anclaje con una profundidad de $a = 3\text{ mm}$ y una longitud $2c = 65\text{ mm}$, localizada mediante pruebas no destructivas, método de líquidos penetrantes, en uno de los anclajes. Estas pruebas fueron realizadas en el laboratorio del Instituto Mexicano del Transporte, el cual cuenta con personal certificado para realizar esta clase de inspección [12].

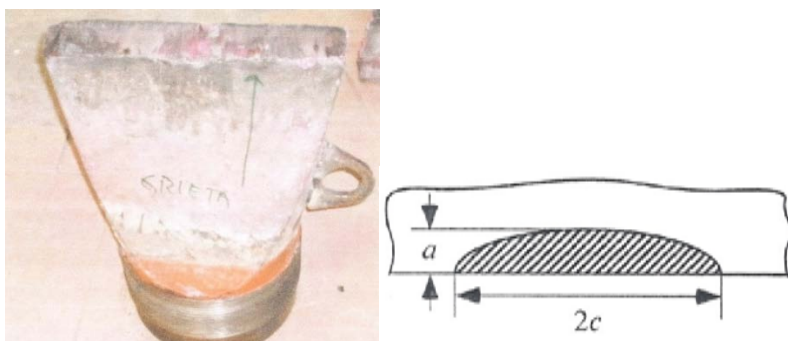


Figura 3. Grieta encontrada en anclaje [12] y geometría de la grieta.

3.4 FACTOR DE INTENSIDAD DE ESFUERZOS (K_I) DE ANCLAJE

Para determinar K_I de un componente estructural generalmente se recurre a manuales o compendios [8,13] que contienen expresiones para geometrías típicas como es una placa, un tubo, un recipiente de presión entre otras. Sin embargo, la geometría del anclaje de este trabajo no se encuentra reportada en ninguno de estos compendios, por lo que se recurrió al método de elemento finito para conocer el valor de K_I del anclaje con grieta. El cálculo de K_I del anclaje se hizo utilizando el software Ansys workbench.

Como primer paso se creó un nuevo material con los datos obtenidos de los ensayos de tensión $E = 199 \text{ GPa}$ y el coeficiente de Poisson de $\nu = 0.33$. Además se caracterizó el material con los datos de la curva esfuerzo-deformación real, de uno de los ensayos de tensión [1]. Después se generó el modelo del anclaje (figura 4a) cuyas dimensiones se muestran en la figura 4b.

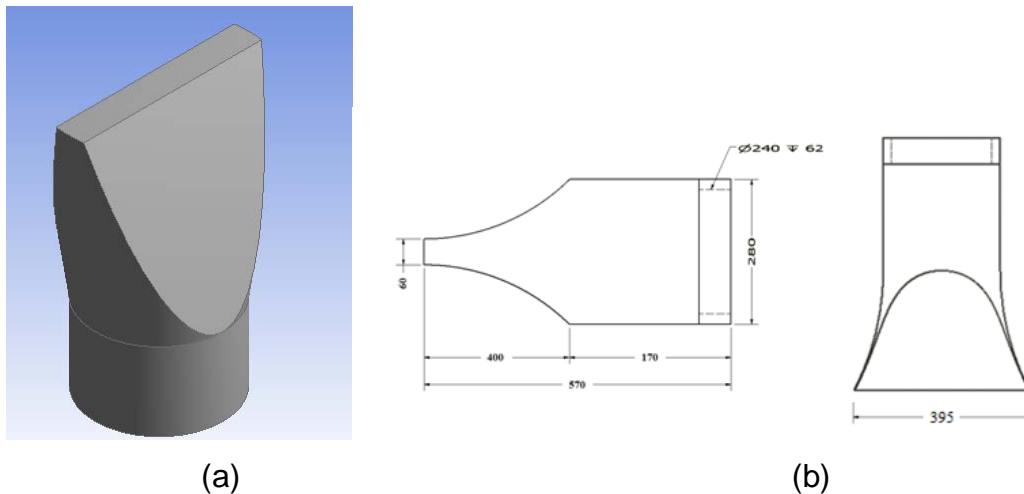


Figura 4. (a) Modelo del anclaje, (b) Dimensiones del anclaje [4].

Como paso siguiente se creó y ubico la grieta a 10 mm del filo y centrada, creando un nuevo sistema de ejes coordenados con origen en esa ubicación, se le asignaron las

dimensiones de grieta encontradas en el anclaje, con $a = 3 \text{ mm}$ y $c = 32.5 \text{ mm}$, además se exigía una dimensión más que es el espesor de la grieta, la cual se le asignó un valor de 2 mm , ya que se observaba un valor máximo de K_I a este espesor. El mallado para la grieta tiene que ser tetraédrico ya que es el único que acepta para realizar los cálculos.

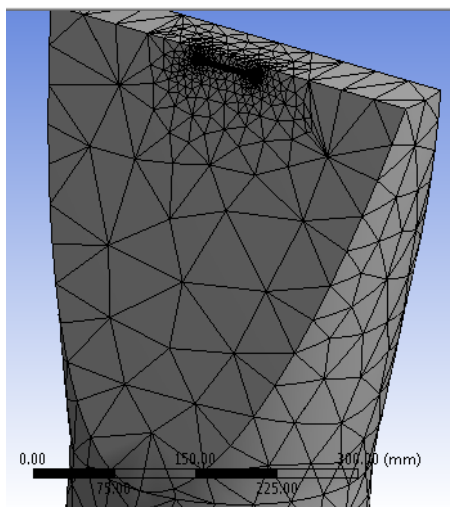


Figura 5. Ubicación de la grieta.

Después de ubicar la grieta y caracterizarla se procedió a aplicar las condiciones de frontera, se restringió en las 3 direcciones (X, Y y Z) la cara inferior del elemento, donde se encuentra fijo con la placa de soporte, en la figura 6a se puede apreciar el elemento fijado. La fuerza, 2.89 MN para análisis 1 y 3.06 MN para análisis 2, es aplicada en las caras superiores del anclaje (figura 6b).

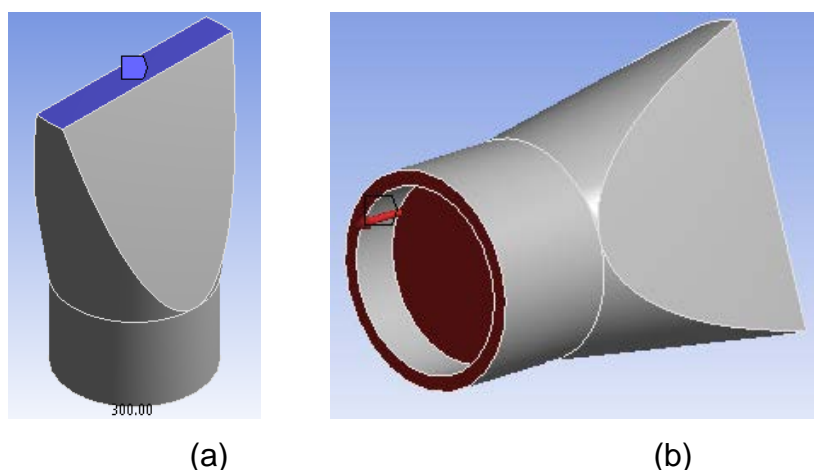


Figura 6. Restricción de la cara y Aplicación de fuerza respectivamente.

Una vez generado el modelo, caracterizar la grieta y aplicar las condiciones de frontera, el siguiente paso es solucionar el modelo, obteniendo los factores de intensidad de esfuerzos (K_{IC}) mostrados en la tabla 2.

Tabla 2. Resultados K_I anclaje.

	K_I MPam ^{0.5}
Fuerza 1	12.35
Fuerza 2	13.10

3.5 K_r y L_r

Como se mencionó anteriormente para evaluar simultáneamente la fractura y el colapso plástico es necesario tener dos variables adimensionales. Para ello necesitamos una relación entre las variables L_r y K_r (ecuaciones 1 y 2), evaluadoras de la seguridad frente a colapso plástico y fractura respectivamente, al ser σ_r el esfuerzo en la sección transversal donde se encuentra la grieta, σ_Y la resistencia a la fluencia, K_I el factor de

intensidad de esfuerzos y K_{IC} la tenacidad a fractura del material. Relación que representa una situación crítica, es decir, ha de separar situaciones aceptables de no aceptables.

$$K_r = \frac{K_I}{K_{IC}} \quad (1)$$

$$L_r = \frac{\sigma_r}{\sigma_Y} \quad (2)$$

Los esfuerzos obtenidos se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Esfuerzos en placa y anclaje.

	Fuerza MN	Área m ²	Esfuerzo MPa
Anclaje	2.89	0.0254	113.63
	3.06		120.45

Los valores para cada término de las ecuaciones 1 y 2 y los resultados se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Resultados K_r y L_r .

	Fuerza	σ_r MPa	σ_Y MPa	K_I MPam ^{0.5}	K_{IC} MPam ^{0.5}	K_r	L_r
Anclaje	1	113.63	323.00	12.35	39.40	0.31	0.35
	2	120.45	323.00	13.10	39.40	0.33	0.37

3.6 CONSTRUCCIÓN DAF

Se realizaron tres DAF, basados en diferentes procedimientos con el objetivo de comparar los resultados y observar que tan conservadores son unos con respecto a otros. Los diagramas se realizaron graficando las ecuaciones utilizando el software de cálculo Excel. El primero de ellos es el DAF que Dugdale propuso, expresado en la ecuación 3.

$$K_r = L_r \left[\frac{8}{\pi^2} \ln \left(\sec \left(\frac{\pi}{2} L_r \right) \right) \right]^{-1/2} \quad (3)$$

En el segundo diagrama que se construyó se utilizó las ecuaciones de la opción 1 del procedimiento FITNET [12], la cual es la mínima recomendada, para materiales con una curva esfuerzo-deformación continua, denominada opción estándar, sólo se requiere los datos más simples de las propiedades del material para esta opción de análisis, $E = 199$ GPa, $\sigma_Y = 323$ MPa y $\sigma_U = 621$ MPa. La línea de fallo está caracterizada por dos ecuaciones que dependen del valor de L_r . Al sustituir los datos correspondientes quedan las ecuaciones 4 a 7.

$$K_r = (1 + 0.5L_r^2)^{-0.5} [0.3 + 0.7 \exp(-0.6L_r^6)] \quad L_r \leq 1 \quad (4)$$

$$K_r = K_r(1) L_r^{-2.973} \quad 1 \leq L_r \leq L_r^{max} \quad (5)$$

$$K_r = 0 \quad L_r > L_{max} \quad (6)$$

$$L_r^{max} = 1.461 \quad (7)$$

El tercer DAF se realizó en base a la opción 3 del procedimiento FITNET [12], esta opción de análisis requiere un conocimiento más completo de las propiedades del material, datos de curva esfuerzo-deformación [1]. La ecuación para K_r es la misma para todos los materiales, en todos los valores de $L_r \leq L_r^{\max}$. Se basa en la curva de esfuerzo deformación real para el material, y los valores de K_r debe calcularse en intervalos suficientemente pequeños para dar una buena representación del comportamiento del material. La línea de falla se obtiene al graficar la ecuación 8.

$$K_r = \left(\frac{E \varepsilon_{real}}{\sigma_r} + \frac{L_r^2 \sigma_r}{2E \varepsilon_{real}} \right)^{-0.5} \quad (8)$$

Donde ε_{real} es el valor de la deformación verdadera obtenida de la curva tensión deformación para un valor de la tensión verdadera $L_r \sigma_Y$. E es el módulo de elasticidad del material y σ_Y es el límite elástico del material en variables ingenieriles.

4. RESULTADOS

4.1 CONDICIÓN DEL ANCLAJE

Los 3 DAF obtenidos se muestran en la figura 7 y además se ubican las coordenadas K_r y L_r para las fuerzas 1 y 2 de análisis. Se observa que para los análisis realizados la condición del anclaje es aceptable.

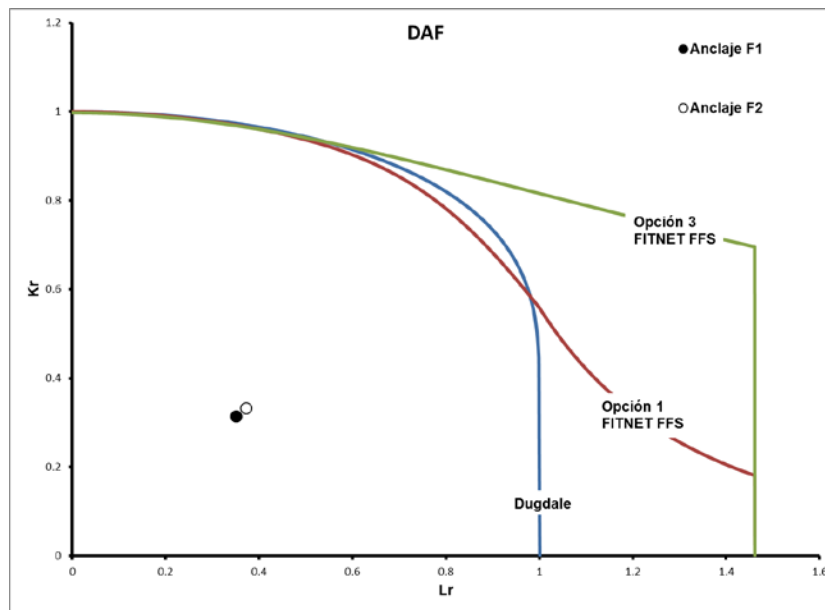


Figura 7. Comparación de DAF.

4.2 FACTOR DE SEGURIDAD

Siguiendo la metodología descrita se obtuvieron los factores de seguridad, los resultados se pueden observar en la tabla 5.

Tabla 5. Factores de seguridad de Anclaje.

Fuerza	DAF	Factor de Seguridad
1	Dugdale	2.46
	Opción 1	2.38
	Opción 3	2.66
2	Dugdale	2.32
	Opción 1	2.25
	Opción 3	2.51

4.3 CARGA CRÍTICA

Como la línea de carga del anclaje para el análisis de la fuerza 1 y 2 tiene una pendiente aproximadamente igual, las cargas críticas son iguales para los dos análisis de fuerzas. Las cargas críticas del anclaje se encuentran en la tabla 6.

Tabla 6. Carga crítica Placa y Anclaje.

DAF	Carga critica (MN)
Dugdale	6.95
Opción 1	6.74
Opción 3	7.53

4.4 TAMAÑO DE GRIETA CRÍTICO

Otra de las condiciones críticas del componente es el tamaño de grieta crítico, siendo esta la dimensión de la grieta a la cual el componente fallaría si se mantuviese el valor de la carga constante. Se calculó utilizando el primer criterio de ruptura, el cual indica que cuando el factor de intensidad de esfuerzos (K_I) iguala a la tenacidad a la fractura (K_{IC}), la fisura se propagará de forma inestable o brusca, fallando el componente.

Los cálculos se hicieron de forma iterativa variando la dimensión “a” de la grieta, manteniendo la relación a/c constante. Se utilizaron dos relaciones de a/c para realizar

los cálculos del factor de intensidad de esfuerzos, $a/c = 1$ y $a/c = 0.2$, estas son las situaciones más críticas que se pueden presentar [4].

Para el anclaje con la fuerza 1 y relación $a/c = 1$, se observó que antes de llegar a obtener un K_I igual a K_{IC} las dimensiones de la grieta sobrepasaban las del anclaje y ANSYS workbench marcaba error y no daba solución, las dimensiones de la grieta máxima aceptada son: $a = 69.7$ mm y $c = 69.7$ mm, dando un valor de $K_I = 35.88$ MPam^{0.5}, para la relación $a/c = 0.2$ las dimensiones críticas de la grieta son: $a = 31.20$ mm y $c = 156.02$ mm.

Para el anclaje con la fuerza 2 y relación $a/c = 1$, igualmente que en la fuerza 1, antes de llegar a obtener un K_I igual a K_{IC} las dimensiones de la grieta sobrepasaban las del anclaje y ANSYS workbench marcaba error y no daba solución, las dimensiones máximas aceptadas son: $a = 69.7$ mm y $c = 69.7$ mm dando un valor de $K_I = 38.03$ MPam^{0.5}, para la relación $a/c = 0.2$ las dimensiones críticas de la grieta son: $a = 29.90$ mm y $c = 149.50$ mm.

5. CONCLUSIONES

- En los tres diferentes análisis de Diagramas de Análisis de Falla se observó que el anclaje del puente de estudio con una longitud de grieta de $2c = 65$ mm y una profundidad de grieta de $a = 3$ mm, tanto para el escenario actual de tránsito vehicular y para la proyección de crecimiento del parque vehicular a 30 años, se encuentra debajo de la línea de fallo, esto indica que el anclaje se encuentran en un nivel aceptable, y puede seguir desempeñando su función.
- Para que el anclaje falle con una longitud de grieta $2c = 65$ mm y profundidad de grieta $a = 3$ mm, es necesario que la condición de carga en el puente crezca de

2.89 MN a 7.54 MN, un aumento de 161% en la carga utilizando el DAF opción 3 de FITNET, el cual es el menos conservador.

- Se observó que para las condiciones de carga analizadas, la opción 3 del procedimiento FITNET, el cual ocupa la curva esfuerzo-deformación del material, obtuvo el Factor de Seguridad más alto. Esto indica que se puede obtener un análisis de integridad conservador ocupando la opción 1 de FITNET o el modelo Dugdale, Obteniendo la ventaja de no requerir la curva esfuerzo-deformación del material, al solo bastar con el modulo elástico, esfuerzo de fluencia y esfuerzo último.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Alcaraz Caracheo Luis Alejandro. Análisis probabilístico de integridad de un anclaje de acero estructural. Tesis de Doctorado. Instituto Politécnico Nacional. México, D.F. 2012.
- [2] Anderson T.L., Fracture Mechanics, fundamentals and applications, 3 edición, Editorial Taylor and Francis, Boca Raton, Florida, 2005.
- [3] Cicero González Sergio. Evaluación de la integridad estructural de componentes sometidos a condiciones de bajo confinamiento. Tesis de Doctorado. Universidad de Cantabria. Santander, Marzo de 2007
- [4] Farahmand, Bahram. Fatigue and fracture mechanics of high risk parts. New York, Editorial Chapman & Hall, 1997.
- [5] González Velázquez J. L. Mecánica de Fractura, 2a Edición, Editorial Limusa. México, D.F. 2004.

- [6] Gubeljak N., Zerbst U., Predan J., Oblak M. Application of the european SINTAP procedure to the failure analysis of a broken forklift, *Engineering Failure Analysis*, Volumen 11, 2004, Paginas 33-47.
- [7] Gutiérrez-Solana F., Cicero S., FITNET FFS PROCEDURE: un procedimiento europeo unificado de evaluación de la integridad estructural, *Anales de la Mecánica de Fractura*, Volumen 1, 2007, Paginas 25-42.
- [8] Koçak M., Webster S., Janosch J.J., Ainsworth R.A., Koers R. FITNET Fitness-for-Service (FFS). Volumen 1. Amsterdam, 2006.
- [9] Lacalle R., Cicero S., Madrazo V., Cicero R., Alvarez J.A. Analysis of the failure of a cast iron pipe during its pressure test, *Engineering Failure Analysis*, Volumen 31, 2013, Paginas 168-178.
- [10] Larrainzar C., Korin I., Perez Ipiña J., Analysis of fatigue crack growth and estimation of residual life of the walking beam of an oilfield pumping unit, *Engineering Failure Analysis*, Volumen 17, 2010, Paginas 1038-1050.
- [11] Quintana Rodríguez Juan Antonio. Análisis del método de búsqueda global para la detección de daño y monitoreo estructural de puentes. Tesis de Doctorado. Instituto Politécnico Nacional. México, D.F. 2009.
- [12] Toledano Andrade Juan Carlos. Análisis de esfuerzos en un elemento de anclaje superior de un puente atirantado utilizando modelación por elementos finitos. Tesis de Maestría. Instituto Tecnológico de Celaya. Celaya, Gto. 2009.
- [13] Tada H. Paris P.C and Irwin G.R. *The Stress Analysis of Cracks Handbook*, 2 edición. Paris Production, St. Louis, MO, 1985.